

引用格式:黄晓予,徐晓立,杨迪珊,等.输电塔角钢构件加固性能试验与有限元对比研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):134-141.

Citation: HUANG Xiaoyu, XU Xiaoli, YANG Dishan, et al. Comparative study on reinforcement performance of angle steel members of transmission tower based on experimental and finite element analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 134-141.

# 输电塔角钢构件加固性能试验与有限元对比研究

黄晓予<sup>1</sup>, 徐晓立<sup>1</sup>, 杨迪珊<sup>1</sup>, 翁兰溪<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350000; 2. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建 福州 350000)

**摘要:**为研究不同加固方式对输电塔角钢主构件极限承载力的影响,给老旧角钢输电塔加固提供技术支持。提出针对输电塔主材夹具式和穿孔式 2 种加固形式,分别通过静载试验和参数化有限元模拟,研究不同加固方式、加固位置、连接件间距等参数下加固构件的破坏形态、承载力大小以及加固效果,并分析构件加固机理。研究结果表明:有限元模拟结果与试验结果吻合良好,极限承载力和破坏形态与试验结果相近;加固改变原构件的破坏形态,从整体失稳转变为局部失稳;加固构件两端连接,承载力提高约 7%~8%,而增加中间连接后其加固效果比两端连接提升 1 倍。2 种加固方式均能有效提高构件承载力,中间位置增设连接件可使承载力提高更为显著。

**关键词:**输电塔;角钢;极限承载力;加固;有限元分析

**DOI:**10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.015 **中图分类号:**TU312.1, TU391 **文章编号:**1673-9140(2024)03-0134-08

## Comparative study on reinforcement performance of angle steel members of transmission tower based on experimental and finite element analysis

HUANG Xiaoyu<sup>1</sup>, XU Xiaoli<sup>1</sup>, YANG Dishan<sup>1</sup>, WENG Lanxi<sup>2</sup>

(1. State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350000, China; 2. Power China Fujian Electric Power Survey & Design Institute, Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** In order to provide technical support to the reinforcement for old angle steel transmission towers, studies of the effects on the ultimate bearing carrying capacity of angle steel leg member under different reinforcement methods were conducted. In this paper, two main reinforcement methods of fixture and perforation types for angle steel leg member were proposed. The failure mode, bearing capacity and reinforcement effect of reinforced members are studied under different reinforcement methods, reinforcement positions and connector spacing by static load test and parametrization finite element simulation, and then the reinforcement mechanism of members is analyzed. The results show that: the finite element simulation results are in good agreement with the test results, the ultimate bearing capacity and damage pattern are similar to the test results. The reinforcement changes the damage pattern of the original member, from overall instability to local instability. The bearing capacity is increased by about 7% ~ 8% when the two ends of the reinforced member are connected, and the reinforcement effect is doubled after the middle connection is added. Both types of reinforcement are effective in increasing the bearing capacity of the elements, and with the addition of intermediate joints increasing the bearing capacity even more significantly.

**Key words:** transmission tower; angle steel; ultimate bearing capacity; reinforcement; finite element analysis

作为输送电能的主要载体,高压输电塔的整体安全性影响着电网系统的正常运作<sup>[1]</sup>。老旧输电塔

往往存在不同程度损伤,在强风作用下,其主要受力构件可能超过极限承载力,从而导致倒塌<sup>[2]</sup>,这种铁

收稿日期:2022-06-22;修回日期:2023-10-26

基金项目:国家自然科学基金(51778072);国网福建省电力有限公司科技项目(52130N20000H)

通信作者:黄晓予(1987—),女,硕士,高级工程师,主要从事输电线路工程评审及管理方面的研究;E-mail:375718021@qq.com

塔的倒塌表现为局部杆件首先失效并向主材延伸<sup>[3]</sup>。因此,科学合理地加固老旧输电铁塔是一个亟待解决的工程问题<sup>[4]</sup>。

众多学者开展了输电塔主材受力机理和破坏机制的理论和试验研究,发现初始变形和残余应力等参数<sup>[6]</sup>以及偏心受压<sup>[7-8]</sup>对角钢极限承载力对主材承载力均有较大影响,另一方面,主材角钢的弯矩影响也不可忽视<sup>[5]</sup>。因此,文献[9]基于实验与数值分析提出了一个适合的角度承载力计算公式,并采用相关理论对该公式进行了验证。针对主材破坏,学者们提出了大量的加固方法。文献[10]提出了构件并联法的概念,该方法是通过并联角钢与原角钢形成的十字组合截面共同承受荷载和抵抗变形,轴力可以通过螺栓拼接系统有效地在原塔构件和加固构件之间传递<sup>[12]</sup>,承载力提升显著<sup>[11]</sup>。十字形组合截面加固方案主要有穿孔式连接板加固和夹具式连接板加固。穿孔式加固方便操作,但在主材上打孔会削弱截面导致角钢最终承载力降低<sup>[13]</sup>,在动载作用下螺栓的预紧力损失会随着荷载循环次数增加而增加,导致构件的承载力退化<sup>[14]</sup>。夹具式加固法可避免在主材上钻孔,加固后角钢承载力具有明显提升,相应的抗风能力得到大幅提高<sup>[15-16]</sup>,但其施工工艺要求更高。显然,加固方法直接影响主材的加固

效果。

本文以典型角钢 $\angle 125 \times 8$ 为研究对象,提出了穿孔式和夹具式 2 种加固方案,分别通过静载试验和有限元模拟研究不同加固方式、加固位置、连接件间距等参数下加固构件的破坏形态、承载力大小以及加固效果,分析了构件加固机理,得出了一些有助于主材加固的设计结论。

## 1 试验方案

### 1.1 试验设计

本文试验加固的角钢型号为 $\angle 125 \times 8$ ,针对笔者提供的 2 种加固方式,将构件分为 3 组,材料性能及具体参数如图 1 所示,试验方案如表 1 所示。该组构件主材角钢长为 1 500 mm,为了避免副材直接受力,副材角钢长为 1 480 mm。构件上、下端加载板尺寸分别为 400 mm $\times$ 400 mm $\times$ 30 mm 和 280 mm $\times$ 360 mm $\times$ 30 mm,角钢与上、下端板之间均采用焊接连接,角钢的形心位置与端板的形心位置重合,确保荷载作用于形心位置。试验中所有螺栓均为 8.8 级高强螺栓,加固构件中的螺栓在试验开始前按照预设的预紧力拧紧,预紧力为 30 kN。夹板、主材角钢、副材角钢、连接板等均采用 Q355 规格的钢材,材料性能实验结果如表 2 所示。

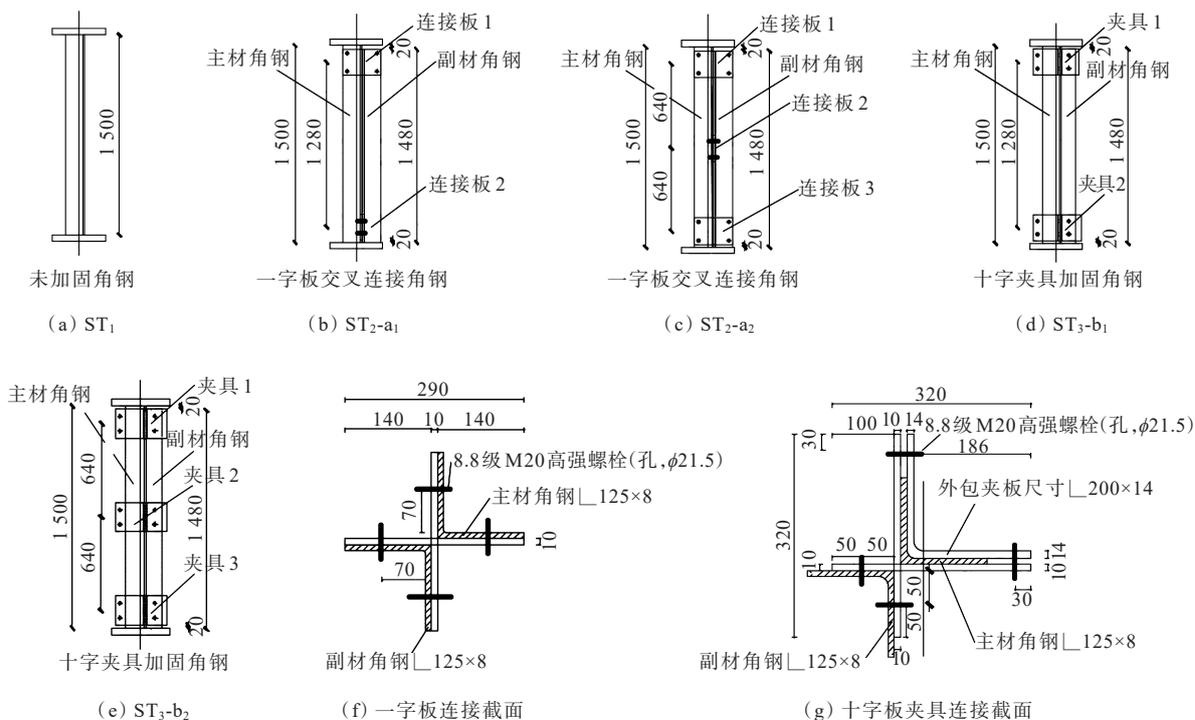


图 1 加固构件(单位:mm)

Figure 1 Detail drawing of reinforcing components(Unit:mm)

表 1 构件参数

Table 1 Table of component parameters

构件分组	构件编号	构件形式	主材长度/ 副材长度/		加固件 数量	主材尺寸/ 副材尺寸/	
			mm	mm		mm	mm
ST <sub>1</sub>	ST <sub>1</sub>	未加固	1 500	—	—	└125×8	—
ST <sub>2</sub>	ST <sub>2</sub> -a <sub>1</sub>	一字板交叉加固	1 500	1 480	2	└125×8	└125×8
	ST <sub>2</sub> -a <sub>2</sub>	一字板交叉加固(中间设加固)	1 500	1 480	3	└125×8	└125×8
ST <sub>3</sub>	ST <sub>3</sub> -b <sub>1</sub>	十字板夹具加固	1 500	1 480	2	└125×8	└125×8
	ST <sub>3</sub> -b <sub>2</sub>	十字板夹具加固(中间设加固)	1 500	1 480	3	└125×8	└125×8

表 2 材性试验结果

Table 2 Material property test results

构件编号	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$E$ /GPa
ST <sub>1</sub>	370.45	568.34	210
ST <sub>2</sub>	366.58	576.66	208
ST <sub>3</sub>	368.93	571.82	212
平均值	368.65	572.27	210

1.2 试验加载装置

本次试验采用立位试验,加载装置为500 t的WHY-5 000压力试验机,其竖向最大加载力为5 000 kN。正式加载前施加一个较小的轴向力固定构件,避免加载时产生滑移,具体试验设备如图2所示。

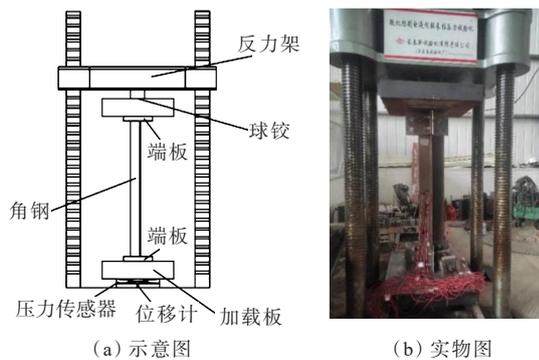


图 2 试验加载装置

Figure 2 Test loading device diagram

1.3 加载方案

本次试验的加载过程分为预加载和正式加载2个阶段。试验开始前先通过有限元数值模拟出构件大致的承载力作为其设计荷载,预加载施加荷载为设计荷载的5%,目的是闭合空隙,同时检查装配是否有问题。正式加载按照10%设计荷载的加载方案进行逐级加载试验,80%荷载以前采用荷载控制加载,80%以后采用位移控制加载。荷载控制加载次序:在荷载加载初期,每级荷载为30~40 kN,一直到设计荷载的40%左右,减小每级

荷载的施加,每级荷载改为20~30 kN,加载至构件设计荷载的80%时,改为位移控制加载。位移控制加载原则:80%设计荷载以后按照速度为0.2 mm/min的位移控制进行加载,到达极限荷载后将速度改为0.5 mm/min的位移控制继续进行加载,直至破坏。达到每一级荷载,均对荷载进行保持1 min,在荷载保持阶段进行荷载、应变等数据的采集。当荷载达到峰值后,降低荷载至极限荷载的70%左右,或者当构件的荷载一位移曲线与轴线几乎平行,构件出现较大的水平位移且已经失稳的时候,此时认为构件已经破坏,立即停止加载。

1.4 测点布置

本试验的构件竖向轴心位移通过试验机上的位移计测量,为了保证位移测量的准确性,在角钢底部和顶部的端板各布置1个百分表,最后取位移计和百分表读数的平均值。本次试验在距离上半部分的夹具(连接板)位置约40 mm处布置一层应变测点,对于中间位置没有加固件的角钢,在中间L/2的位置布置一层应变测点,在主、副材角钢每层布置4个应变片,分别位于角钢肢肢长的1/3处和2/3处,则每层一共8个应变测点,每个构件总共16个测点,由主材角钢到副材角钢,从上到下编号为A、B,A层编号为A<sub>1</sub>~A<sub>8</sub>,B层编号为B<sub>1</sub>~B<sub>8</sub>,具体构件应变片布置截面如图3所示。

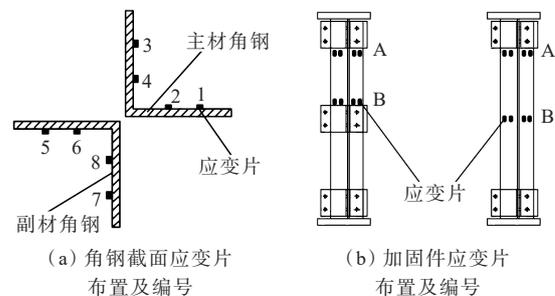


图 3 构件应变片布置示意

Figure 3 Schematic diagram of strain gauge arrangement of components

## 2 有限元模拟

为了做进一步的对比和验证,针对上述2种加固方案,采用ANSYS软件对所有构件进行有限元分析。为了模拟真实构件受力情况,本文取 $L/1000$ 的初弯曲来分析。构件网格划分使用ANSYS软件自带的智能网格划分方法,螺栓的网格尺寸为8 mm,主材和副材角钢、连接板、夹具、十字板的网格尺寸均为20 mm,本文中所有构件单元采用solid92实体单元模拟,该单元适用于对不规则结构的分析,构件网格划分如图4所示。

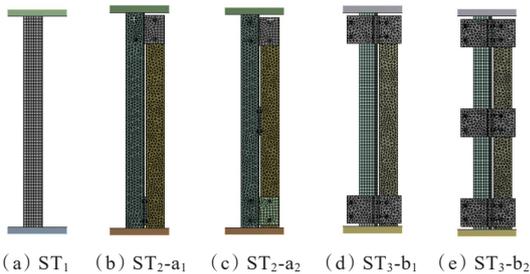


图4 构件网格划分

Figure 4 Component meshing diagrams

本模型采用双线性等向强化模型,强化段的弹性模量(切线模量)为 $0.01 E_s$ ,即为2 100 MPa。其本构关系如图5所示,具体表达式为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \sigma_s, & 0 < \epsilon_s < \epsilon_y \\ f_y + 0.01 E_s (\epsilon_s - \epsilon_y), & \epsilon_s > \epsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_s$ 为钢材应力; $E_s$ 为钢材的弹性模量; $f_y$ 为屈服强度; $\epsilon_s$ 为钢材应变; $\sigma_y$ 为屈服应变。

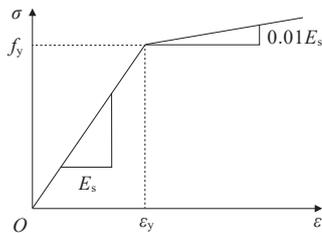


图5 材料本构关系

Figure 5 Material constitutive relation

在模型加载过程中,首先需要对构件的螺栓施加30 kN的预紧力,之后在主材角钢的顶部加载板的形心位置施加一个轴向荷载作用,轴向荷载施加则采用位移加载的形式。

## 3 结果分析

### 3.1 破坏形态

试验所得结果与数值模拟所得破坏结果的对比

如图6所示。从最终破坏形态来看,未加固构件 $ST_1$ 的整体呈S形弯曲破坏,构件组 $ST_2$ 和 $ST_3$ 则是发生局部屈曲失稳破坏,其中,构件 $ST_2$ -a<sub>1</sub>的破坏发生在一字板1下方接近中间位置处,构件 $ST_2$ -a<sub>2</sub>的破坏发生在一字板1和一字板2之间(接近一字板1处),构件 $ST_3$ -b<sub>1</sub>破坏发生在夹具1和中间位置之间,构件 $ST_3$ -b<sub>2</sub>的破坏发生在夹具1和夹具2之间。这是由于加固件给构件提供一个侧向支撑,提高了构件的抗侧刚度,其中部轴向刚度变大,导致构件薄弱位置发生了转移,因此加固构件破坏均表现为靠近端部的加固板或者夹具附近的局部扭转失稳,这与文献[13]结果一致。总的来说,在构件的破坏形态方面,试验结果和有限元模拟结果基本吻合,说明有限元模拟的有效性。



图6 试件破坏形态对比

Figure 6 Comparison of damage patterns of specimens

### 3.2 荷载—位移曲线和承载力的对比

荷载—位移曲线可以反映出构件在加载过程中的实时状态,同时也是判别构件失稳的重要依据,图7、表3给出了试验和有限元仿真得到的荷载—位移曲线以及相应的极限承载力对比结果。

由图7可知,有限元模拟曲线与试验曲线的变化趋势基本吻合,幅值最大相差8%。构件组 $ST_2$ 和构件组 $ST_3$ 的承载力相对于未加固角钢 $ST_1$ 均有不同程度的提升,说明2种加固方案都是可行。 $ST_2$ -a<sub>2</sub>承载力提升得最为明显,达到18.5%; $ST_2$ -a<sub>1</sub>提升幅度最小,仅为7.7%。

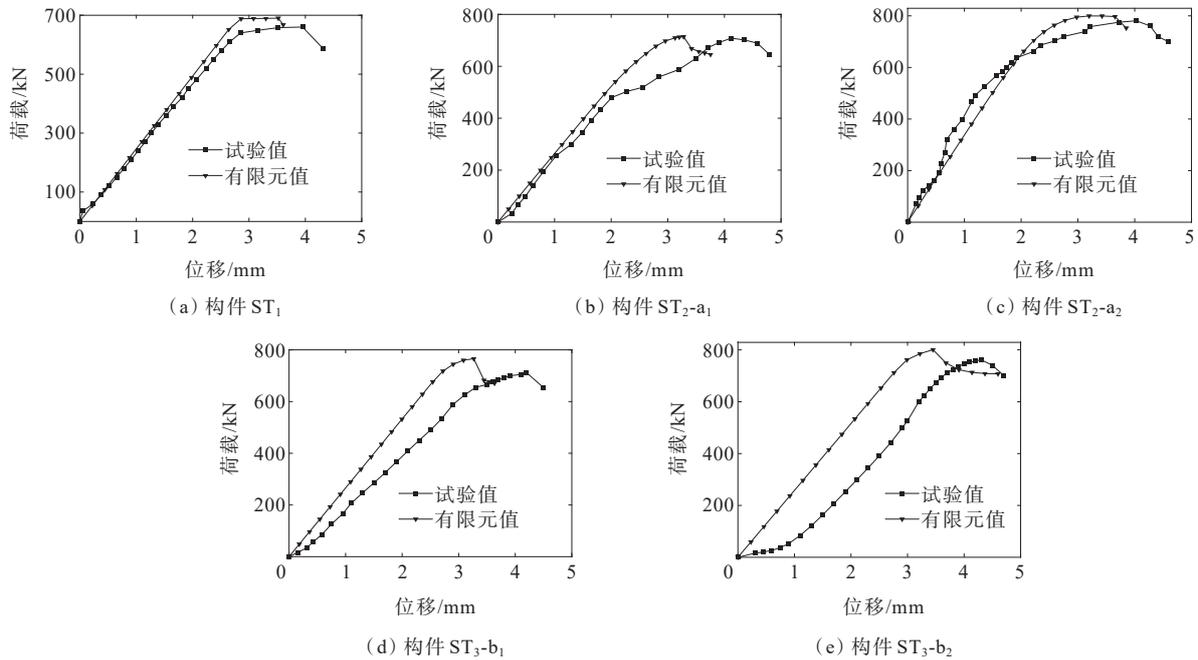


图7 荷载—位移曲线对比

Figure 7 Load-displacement curve comparison

表3 试验与有限元极限承载力对比

Table 3 Comparison table between test and finite element ultimate load capacity

构件组	构件编号	有限元模拟极限承载力/kN	试验极限承载力/kN	试验承载力提升率/%	误差/%
ST <sub>1</sub>	ST <sub>1</sub>	690.0	658.1	—	4.84
ST <sub>2</sub>	ST <sub>2</sub> -a <sub>1</sub>	714.3	708.8	7.7	0.78
	ST <sub>2</sub> -a <sub>2</sub>	799.6	780.2	18.5	2.48
ST <sub>3</sub>	ST <sub>3</sub> -b <sub>1</sub>	767.1	711.8	8.2	7.76
	ST <sub>3</sub> -b <sub>2</sub>	800.8	762.0	16.0	4.98

注:提升率=加固构件极限承载力/未加固构件极限承载力。

对比试验和有限元的荷载—位移曲线可以发现,试验的荷载—位移曲线达到极限荷载时的位移值要大于有限元模拟的数值,但是其相应的极限承载力均略小于有限元的极限承载力,认为主要原因可能有:

1) 有限元模型的本构关系是简化过的理想状态下的本构关系;

2) 试验构件在加工制作过程中存在一定的加工误差,比如螺栓打孔位置也存在一定的误差;

3) 构件在安装过程中与加载装置的形心未完全重合,以及构件自身由于初始缺陷存在一定的初偏心;

4) 试验构件的螺栓预紧力在加载过程中,尤其是接近极限承载力时,会出现一定程度的松弛,从

而使其承载力降低,而有限元模型则不会出现预紧力松弛这一现象。

由表3可知,构件中间是否设置加固件对构件承载力的影响显著。中间设置加固件对角钢承载力提升明显,造成这一现象的原因可能是中间设置加固件增大了抗侧刚度,以及增强了加固件与主材角钢共同受荷能力,使得轴向压力能更加有效地传递给副材角钢,从而提高其承载力。

### 3.3 荷载—应变曲线

构件的应变片能够有效地反映出构件在受力过程中的截面的受力状态,图8给出了各组构件的荷载—应变曲线,图中序号1~4为主材上测点、序号5~8为副材上测点。由图8的荷载—应变曲线可以看出:

1) 对于所有加固角钢构件,副材角钢在整个加载过程应变变化很小,相对比较稳定,说明副材角钢处于均匀受压阶段,但是在临近极限承载力阶段,副材角钢会有一段非线性增长,结合试验现象可知,这主要是由于主材角钢的屈曲导致副材变形所致。

2) 无论是构件组ST<sub>1</sub>还是构件组ST<sub>2</sub>,在加载初期,各构件的测点均表现出比较稳定的线性增长的趋势,说明此时处于弹性阶段。随着荷载不断增加,加固构件的线性增长趋势越来越弱,开始出现非线性增长,构件进入塑性阶段。当到达极限承载

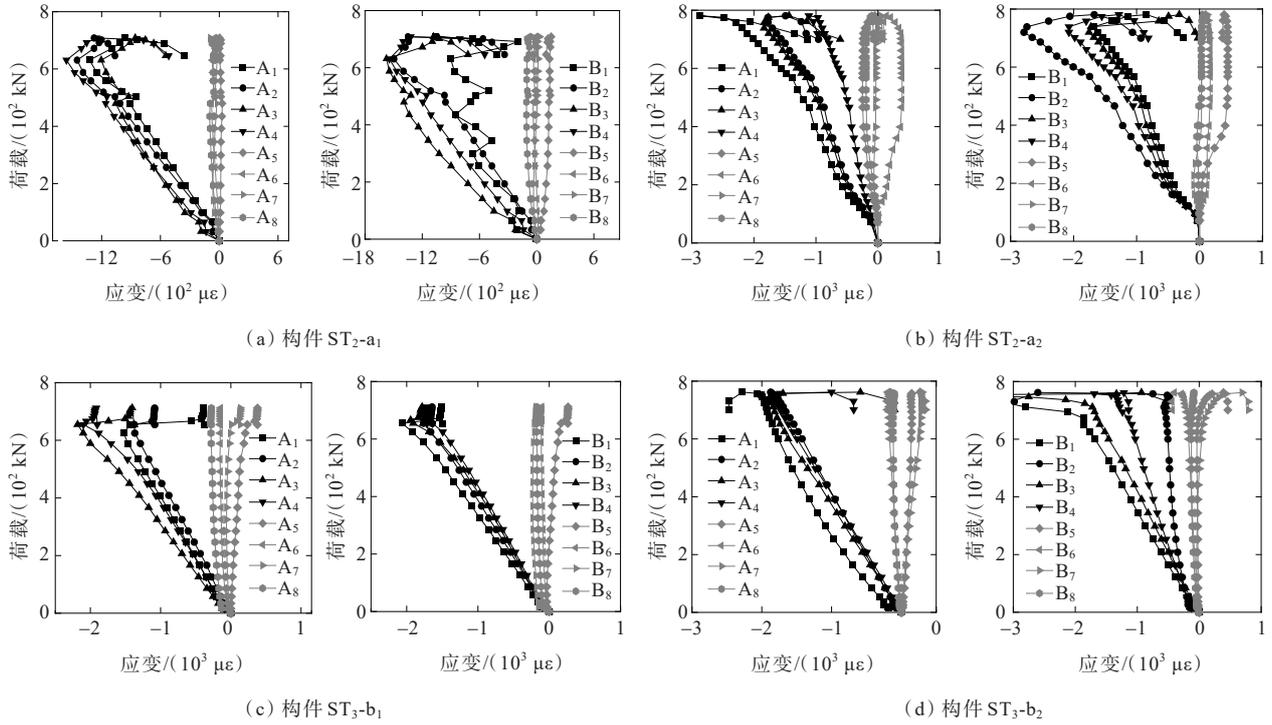


图 8 各构件荷载—应变曲线

Figure 8 Load-strain curve

力时,主材角钢的测点应变值的变化迅速增大,说明破坏发生的位置在主材角钢,且破坏的形式为位于测点层 A 与 B 之间的局部屈曲破坏。

3) 主材角钢发生局部屈曲破坏的位置应变均为负数,即为压应变,说明主材角钢在加载过程中全截面都处于受压状态,且各构件的荷载—应变曲线与荷载—位移曲线有相似之处,呈现一定的规律。荷载—应变数据与试验现象相吻合,具有一定的参考性。

### 4 参数化分析

针对这 2 种加固方式进行参数化分析,以试验构件 ST<sub>2</sub>-a<sub>2</sub> 和 ST<sub>3</sub>-b<sub>2</sub> 为基础模型,主要分析参数有

螺栓预紧力,摩擦系数和副材角钢尺寸。

#### 4.1 副材角钢尺寸对承载力的影响

副材角钢在加固构件加载过程中起到承担部分内力的作用,因此也有必要研究副材角钢的截面尺寸对加固构件承载力的影响,如图 9 所示。有限元模型分别取 L<sub>110</sub>×7、L<sub>125</sub>×8、L<sub>140</sub>×10、L<sub>160</sub>×12 这 4 个副材角钢截面参数进行研究,其副材尺寸分别为 110、125、140、160 mm。

由图 9 可知,副材尺寸对构件承载力存在较小的影响,不同副材尺寸的荷载—位移曲线几乎重合,仅在极限承载力位置处有所区别。其中,对于夹具加固构件,当副材尺寸达 L<sub>160</sub>×12 时,构件的承载力会有小幅度下降,承载力较尺寸

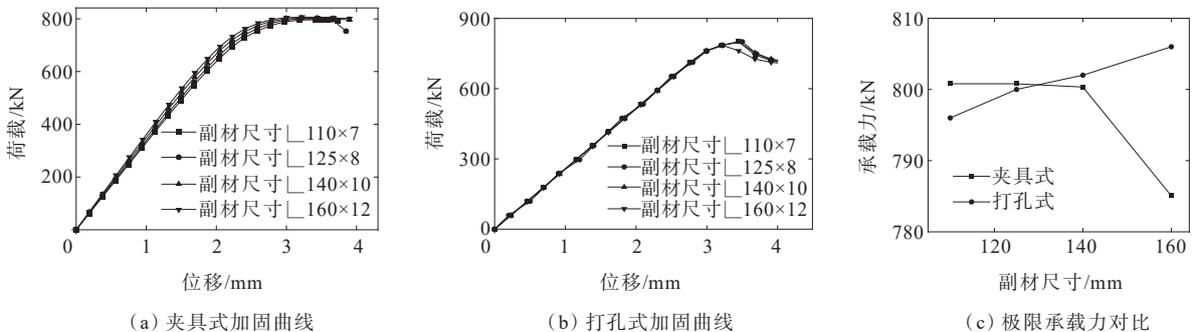


图 9 副材尺寸对 2 种加固方式影响

Figure 9 The effect of substrate size on the two types of reinforcement

为 $\square 125 \times 8$ 的构件下降了15 kN,这一点与加固方案a正好相反,可能的原因是:副材尺寸过大时,副材角钢受力所发生变形极小,不利于内力的传递,从而导致加固构件承载力降低。因此,在实际工程中选择副材角钢时,应当选择略小于主材尺寸或与主材尺寸一致的规格,选择过大的副材角钢尺寸,

不仅会增加预算成本,而且还可能导致构件承载力的下降。

#### 4.2 螺栓预紧力对承载力的影响

则保持其他条件不变,取螺栓预紧力为30、45、60、75、90、105 kN的有限元模型来研究螺栓预紧力对2种加固方式下构件承载力的影响,如图10所示。

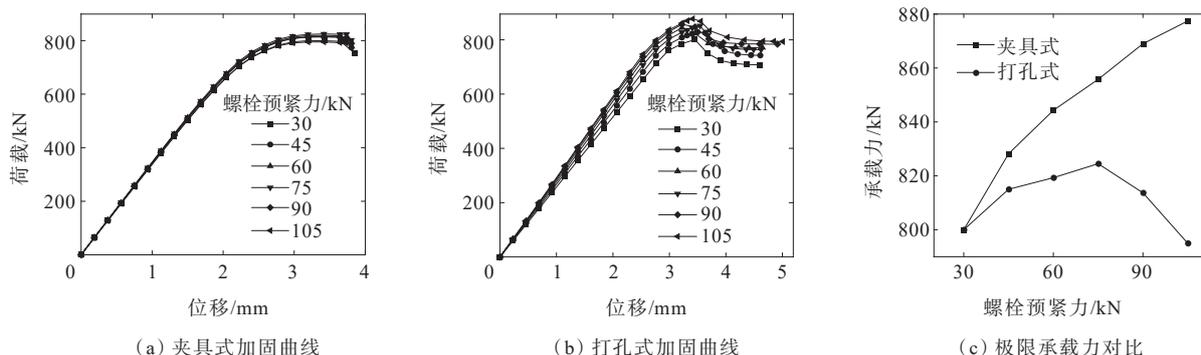


图10 螺栓预紧力对2种加固方式的影响

Figure 10 The effect of bolt preload on the two types of reinforcement

由图10可知,对于一字板加固构件,螺栓预紧力对承载力的影响既有正相关又有负相关,但总体影响不大,笔者认为承载力下降的原因是由于当螺栓预紧力较大时,一字板会产生一定程度的翘曲变形,这种变形削弱了一字板的加固效果,使构件的承载力下降。

对于夹具式加固构件,荷载—位移曲线的变化整体趋势相同。但是其刚度变化值有明显区别,且加固构件的承载力随着螺栓预紧力的增大而增大,螺栓预紧力为105 kN较预紧力为30 kN构件承载力提升77.5 kN,提升率为9.68%,提升效果较一字板构件更为明显。此外,随着螺栓预紧力的增加,承载力增幅趋于平缓,这是由于随着预紧力增加,夹具夹紧效果明显,但当螺栓预紧力较大时,十字

板和外包夹具的翘曲变形也随之越来越明显,此时夹具会和主材角钢之间产生间隙,使夹具与主材角钢的接触面积减小,这会削弱夹具作用,从而使承载力增加幅度减小。

#### 4.3 摩擦系数对承载力的影响

摩擦系数对2种加固方式的影响如图11所示。可知,对于一字板加固构件,摩擦系数对构件承载力影响不大,但是对于夹具式加固构件,摩擦系数的影响十分显著。由图11可知,各荷载—位移曲线几乎没有重合段,当摩擦系数由0.2增加到0.7时,构件的承载力较摩擦系数为0.2时提升了106.5 kN,提升率为13.31%,其对加固效果的提升非常明显,其原因是夹具式加固构件主要通过主材与夹具之间的摩擦力来传递内力,因此摩擦系数增加使得摩擦力增加,进而使得主材和夹具之间的内

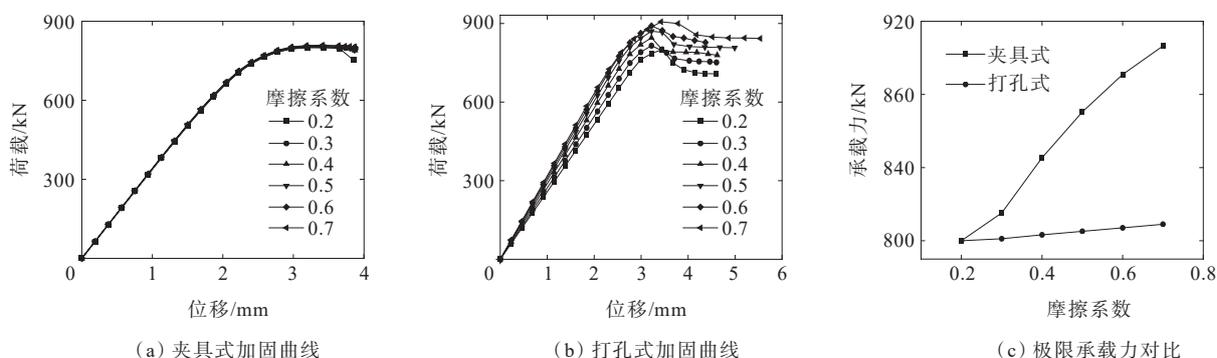


图11 摩擦系数对2种加固方式的影响

Figure 11 The effect of the friction coefficient on the two types of reinforcement

力传递效果也更加明显。

## 5 结语

本文针对输电塔主材的2种主要加固形式,通过轴心受压承载力实验和有限元仿真模拟,得出以下主要结论。

1) 从破坏形态来看,加固构件的破坏形态、承载力大小以及加固效果,有限元模拟结果与试验结果基本吻合,表明有限元模拟可用于该加固方法的精细化研究。

2) 首、尾位置设置加固件可以提高构件的承载力,提高幅度大约7%~8%;而在中间位置增设连接件,其承载力提升更为显著,提升幅度是仅首、尾位置连接的2倍。

3) 一字板加固方法和夹具型加固方法2种方式均能有效提高构件承载力。其承载力提升率可分别提高18.5%和16%。其中一字板加固方法便于施工应用,但会引起主材截面削弱;夹具型加固方法不削弱截面,施工则相对复杂。

4) 对2种加固方式进行参数化分析可以发现,副材角钢尺寸对加固构件的加固效果影响不大,而螺栓预紧力和摩擦系数对夹具式加固构件提升较为明显,因此在实际工程中,可以考虑在夹具与主材角钢的接触面喷砂或者设置凹槽等方式来增加表面粗糙度,以此来提高夹具与主材之间的摩擦力。同时也要定期对加固构件的螺栓进行拧紧,以防预紧力发生松弛而无法满足承载力需求。

### 参考文献:

[1] 王建,吴昊,张博,等.不平衡样本下基于迁移学习-AlexNet的输电线路故障辨识方法[J].电力系统自动化,2022,46(22):182-191.  
WANG Jian, WU Hao, ZHANG Bo, et al. Fault identification method for transmission line based on transfer learning-AlexNet with imbalanced samples[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 182-191.

[2] 严屹然,唐诗洋,于振,等.基于蒙特卡洛模拟的配电网地震灾损预测研究[J].供用电,2022,39(5):76-80+95.  
YAN Yiran, TANG Shiyang, YU Zhen, et al. Research on earthquake damage prediction of distribution network based on Monte Carlo simulation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 76-80+95.

[3] 仲林林,胡霞,刘柯好.基于改进生成对抗网络的无人机电力杆塔巡检图像异常检测[J].电工技术学报,2022,37

(9):2230-2240+2262.

ZHONG Linlin, HU Xia, LIU Keyu. Power tower anomaly detection from unmanned aerial vehicles inspection images based on improved generative adversarial network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2230-2240+2262.

[4] 张焕龙,齐企业,张杰,等.基于改进YOLOv5的输电线路鸟巢检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(2):151-159.

ZHANG Huanlong, QI Qiye, ZHANG Jie, et al. Bird nest detection method for transmission lines based on improved YOLOv5[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 151-159.

[5] 杨月,孙博,马晓忱,等.融合注意力机制的输电线路故障概率预测模型[J].电力建设,2022,43(3):42-49.

YANG Yue, SUN Bo, MA Xiaochen, et al. Prediction model of transmission line fault probability applying attention mechanism[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 42-49.

[6] 刘洪义,李正良,黄祖林.输电塔角钢构件受压稳定承载力研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(12):47-55.

LIU Hongyi, LI Zhengliang, HUANG Zulin. A study on the bearing capacity of angle steel members in transmission towers[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(12): 47-55.

[7] 李正良,李妍,刘红军,等.偏心受压单角钢构件力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(5):146-155.

LI Zhengliang, LI Yan, LIU Hongjun, et al. Experimental study on mechanical behavior of single angle under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 146-155.

[8] 胡海洋,张欢,伍晓红,等.基于等线长迭代的特高压直线塔地线不平衡张力计算[J].智慧电力,2023,51(2):118-123.

HU Haiyang, ZHANG Huan, WU Xiaohong, et al. Calculation of unbalance tension of ground wire for UHV suspension tower based on equilinear length iteration[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 118-123.

[9] 曹世山,张大长,高正平.单角钢轴压承载力试验对比及理论分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2017,39(3):108-113.

CAO Shishan, ZHANG Dachang, GAO Zhengping. Experimental and analytical research on axial bearing capacity of single steel angles[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(3): 108-113.

[10] 王增平,相禹维,王彤.台风暴雨灾害下的110 kV线路倒塔与断线事故评估方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):59-66.

- JING Jiangping, YU Xiaochan, LIU Yuan. Three-phase virtual flux linkage observation grid-connected inverter prediction technology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 157-164.
- [17] 吴汪平, 楚皓翔, 解大, 等. PI控制器参数对并网永磁直驱型风力发电系统机网相互作用的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 21-28.
- WU Wangping, CHU Haoxiang, XIE Da, et al. Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of grid-connected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 21-28.
- [18] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1456-1465.
- [19] 马幼捷, 陶珑, 周雪松, 等. 结合自抗扰的风电系统电压环模糊自适应控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 330-337.
- MA Youjie, TAO Long, ZHOU Xuesong, et al. Fuzzy adaptive control of voltage loop in wind power system combined with linear active disturbance rejection control [J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(12): 330-337.
- [20] 刘英培, 张腊, 梁海平, 等. 适用于风电并网的 VSC-HVDC 系统模型预测控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 102-108+114.
- LIU Yingpei, ZHANG La, LIANG Haiping, et al. Model predictive control of VSC-HVDC system for wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 102-108+114.
- [21] 徐红灿, 滕予非, 王晓茹. 基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 95-102.
- XU Hongcan, TENG Yufei, WANG Xiaoru. A control strategy combining repetitive control and quasi-PR control for PMSG grid-side converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 95-102.
- [22] 周佩朋, 宋瑞华, 李光范, 等. 基于附加比例谐振控制的风机次同步振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3797-3807.
- ZHOU Peipeng, SONG Ruihua, LI Guangfan, et al. Subsynchronous oscillation mitigation method for wind turbines based on additional proportional resonance control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3797-3807.
- [23] 刘毅力, 李丁, 李明贤, 等. RoCoF下垂控制的直驱式风电系统惯量特性分析[J]. 电源学报, 2020, 18(6): 94-104.
- LIU Yili, LI Ding, LI Mingxian, et al. Inertia characteristic analysis of RoCoF droop control based direct-driven wind power system[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(6): 94-104.
- [24] 李珠林, 李慧, 刘思嘉, 等. 基于 MPCC-PI<sup>D</sup>控制的直驱永磁风力发电系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 1-10.
- LI Zhulin, LI Hui, LIU Sijia, et al. Direct-driven permanent magnet wind power generation system based on MPCC-PI<sup>D</sup> control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 1-10.

(上接第 141 页 Continued from page 141)

- WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 59-66.
- [11] MILLS J E, MA X, ZHUGE Y. Experimental study on multi-panel retrofitted steel transmission towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 58-67.
- [12] 连继业, 王绪湘, 汪大海, 等. 输电铁塔结构构件夹具式加固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 42-46.
- LIAN Jiye, WANG Xuxiang, WANG Dahai, et al. Experimental research on mechanical properties of structural members for transmission tower reinforced with clamps[J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 42-46.
- [13] 朱云祥, 张若愚, 曹枚根, 等. 海岛大跨越输电塔线体系风振响应及风振系数[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 111-121.
- ZHU Yunxiang, ZHANG Ruoyu, CAO Meigen, et al. Wind induced vibration response and coefficient of large crossing transmission tower line system between islands [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 111-121.
- [14] LU C H, MA X, MILLS J E. The structural effect of bolted splices on retrofitted transmission tower angle members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 95: 263-278.
- [15] 耿贞伟, 苏文伟, 于凤荣, 等. 基于 Ansys 的高压输电塔风振特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 84-90.
- GENG Zhenwei, SU Wenwei, YU Fengrong, et al. Analysis of wind vibration response of high-voltage transmission tower based on Ansys[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 84-90.
- [16] 苏子威. 输电塔主材夹具加固构件的受力性能研究及输电塔抗风分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- SU Ziwei. Study on mechanical behavior of reinforcement of transmission tower leg with fixture and wind resistance analysis of transmission tower[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.